

# 酸化物高温超伝導体の電流リードへの応用に関する研究

著者	山田 豊
号	1507
発行年	1994
URL	<a href="http://hdl.handle.net/10097/10314">http://hdl.handle.net/10097/10314</a>

氏 名	やま だ ゆたか 山 田 豊
授 与 学 位	博 士 ( 工 学 )
学位授与年月日	平成 6 年 6 月 8 日
学位授与の根拠法規	学位規則第 4 条第 2 項
最 終 学 歴	昭 和 52 年 3 月 東北大学大学院工学研究科金属加工学専攻前期 2 年の課程修了
学 位 論 文 題 目	酸化物高温超伝導体の電流リードへの応用に関する研究
論 文 審 査 委 員	東北大学教授 池田 圭介    東北大学教授 桑名 武 東北大学教授 進藤 裕英    東北大学教授 花田 修治 東北大学助教授 渡辺 和雄

## 論 文 内 容 要 旨

### 第 1 章 序 論

1986年に発見された酸化物超伝導体は、従来の金属系超伝導体に比べ、高い臨界温度 ( $T_c$ ) および臨界磁場を有する極めてポテンシャルの大きい材料である。しかしながら、酸化物超伝導体は輸送電流の方位依存性が強く、またセラミックス特有の難加工性等により多結晶バルク材の臨界電流密度 ( $J_c$ ) は、応用上十分な値に達していないのが現状である。

そこで、本研究では液体窒素温度：77K 以上の  $T_c$  値および Bi 系酸化物バルク材の輸送電流としての  $J_c$  値に及ぼす加工・熱処理の影響について先ず検討した。また、酸化物超伝導バルク材の応用として、その低熱伝導性に着目し、超伝導機器に電流を供給する電流リードへの応用を検討した。電流リードには、従来銅の細線やパイプ等を束ね、蒸発するヘリウムガスで冷却するガス冷却型と呼ばれる電流リードが通常用いられているが、極低温下に置かれる超伝導機器への熱侵入量が大きく、その低減が切望されていたものである。

その結果、 $T_c$  値が相対的に高く、加工性や安定性にも優れている Bi 系 (2223) 高温相組成の大型バルク材においても、高い  $J_c$  値および輸送電流が得られたので、同バルク材を用い、電流リードにとって最も重要な指標である熱侵入量について評価した。最後に、Bi 系 (2223) バルク材を液体ヘリウムを使わず冷凍機のみで冷却する新しいタイプの超伝導マグネットの電流リードに適用した例について述べる。

## 第2章 部分熔融法による Y 系酸化物超伝導体の特性

本章では、 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$  (123相) の組成を持つ Y 系酸化物超伝導体を部分熔融法により作製し、その組織的特徴と臨界電流密度について評価した。Y 系酸化物の部分熔融組織は、123 相マトリックス中に  $\text{Y}_2\text{BaCuO}_6$  等の非超伝導相が分散・析出しており、磁化測定より算出した  $J_c$  値は、粉末焼結法のそれに比べ 1 桁以上高いものであった。しかしながら、4 端子法による輸送電流で評価した場合には両者にはほとんど差はなく、また、部分熔融法は降温時の変態に伴うクラック発生、結晶配向制御が難点となり大型バルク材の製作が困難である等を考慮し、Y 系酸化物の電流リードへの応用は不相当と判断した。

## 第3章 Bi 系酸化物超伝導体線材の臨界電流密度に及ぼす加工の影響

本章では、Y 系に比べ  $T_c$  値が高く、相対的に加工性や安定性に優れている Bi 系 (2223) 高  $T_c$  相組成の銀シース線材の  $J_c$  に及ぼす加工の影響について検討した。Powder in tube 法で引抜・圧延を経てテープ状とした線材の  $J_c$  値は、初期焼結後プレスと焼結を繰り返す中間プレス法により大幅に向上することが明らかとなった。これは、中間プレスによるバルクの高密度化、結晶の高配向化及び高  $T_c$  相の単相化の結果であり、バルクの  $J_c$  向上に焼結と強加工を繰り返す中間加工法が極めて有効であることが判明した。

## 第4章 中間 CIP 法により作製した中実円柱状 Bi 系酸化物伝導体バルクの特性と熱侵入量

本章では、Bi 系の中実円柱状の大型バルク材に、前章において  $J_c$  向上に著しい効果の認められた中間加圧加工法として、バルクの成形および焼結後の加圧により適した中間 CIP 法を適用した。その結果、77K、自己磁場下で  $J_c = 5 \times 10^4 \text{ A/m}^2$ 、 $I_c \approx 200 \text{ A}$  を得た。また、作製した中実円柱状バルクを用いて、77K~4.2K 間の熱侵入量を評価した。Bi 系酸化物は熱伝導率が低く、超伝導状態においては当然ながら電気抵抗によるジュール発熱が無いことから、熱侵入量は極めて低く、そのほとんどはバルクの高温端からの伝導熱であることが判明した。これは、本バルクが超伝導機器への熱侵入量を大幅に低減する電流リードとして有望であることを示すものである。

## 第5章 中間 CIP 法により作製した中空円筒状 Bi 系酸化物超伝導バルクの特性と熱侵入量

本章では、中間 CIP 法の効果を増しバルクの  $J_c$  値を向上するため、バルクを薄肉中空円筒形状とした。その結果、バルクの  $J_c$  値は 77K、自己磁場下で前章で得られたの値の約 2 倍に当たる  $1 \times 10^5 \text{ A/m}^2$  に達し、 $I_c$  値については断面積にはほぼ比例した値が得られ、1000A を越える輸送電流を得ることが可能となった。これは高温相の単相化、組織の高密度化に加え、薄肉中空円筒形状としたバルクの結晶の高配向化に依るものである。図 1 に高配向化したバルク材の SEM 写真を示す。

また、本バルクを用いた 77 K~4.2 K 間の熱侵入量の評価結果を図 2 に示す。バルク一対の熱侵入量は、通電電流によらずほぼ一定で、直流 800 A 通電時の熱侵入量は約 0.16 W、1 A 当りでは

0.2 mW であった。これは従来より用いられている最適設計されたヘリウムガス冷却型電流リードの熱侵入量のほぼ1/10と極めて低い値である。このように、Bi系酸化物超伝導バルク材は、ガス冷却せずに両端を熱伝導だけで冷却する方法により低熱侵入型の電流リードとして十分な機能を持っていることが判明した。

## 第6章 Bi系酸化物超伝導バルク電流リードの冷凍機冷却型超伝導マグネットへの応用

本章は、前章で得られたBi系バルクを電流リードとして用いて冷凍機冷却型超伝導マグネットに応用した結果について述べたものである。図3に同マグネットの概略を示す。従来、超伝導コイルは、液体ヘリウム冷媒中に浸漬されて冷却されるので小型化の上で制約となっていたのみならず液体ヘリウムの供給が可能な所でしか使用できなかったが、開発したマグネットシステムでは、冷凍機の冷却ステージから直接熱伝導によって冷却するため液体ヘリウム等の冷媒は全く使われていない。これまでも冷凍機によって超伝導コイルを直接冷却するアイデアはあったが、電流リードに金属を用いる限りコイルへの熱侵入量が大きく冷凍機の冷却能力を大幅に上回るため現実的には不可能であった。今般、Bi系酸化物超伝導体を電流リードとして用いることにより、コイルへの熱侵入量を大幅に減少させることができ、実用規模の冷凍機冷却型超伝導マグネットの開発に世界で初めて成功したものである。本章では、電流リードに用いたBi系バルクの特性と冷凍機冷却型超伝導マグネットの構成について述べた、400 A 通電し、4 T の磁場を励磁した時のコイルやBi系バルクリードの温度および電圧等から本マグネットの熱バランス、漏れ磁場、磁界が電流リードに及ぼす影響について言及した。また、強制的にコイルをクエンチさせた時の挙動により、本マグネットの安全性や操作性等の特徴についても述べた。

## 第7章 結 論

本研究により得られた知見を各章ごとに要約し、結論とした。

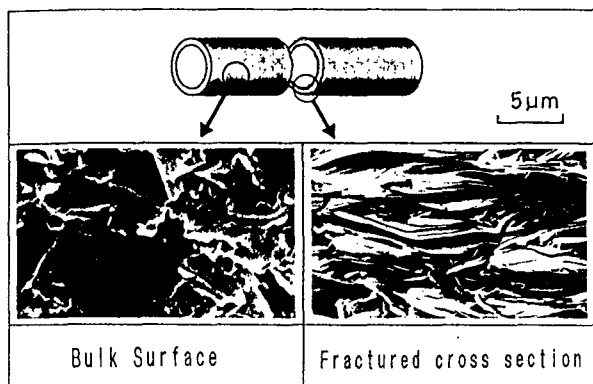


図1 高配向したBi系酸化物バルク材のSEM写真

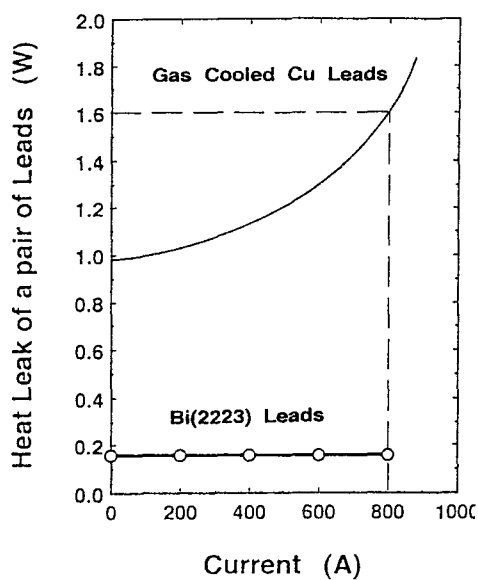


図2 Bi系バルクリードの77~4.2 K間の熱侵入量

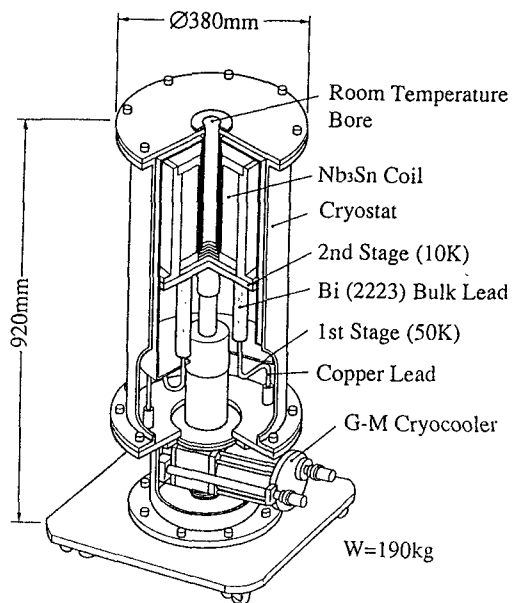


図3 Bi系バルクリードを用いた冷凍機冷却型超伝導マグネット

## 審 査 結 果 の 要 旨

酸化物超伝導体は、従来の金属系超伝導体に比べ臨界温度及び臨界磁場共に高く、ポテンシャルの高い材料として注目されているが、臨界電流密度 ( $J_c$ ) については加工プロセスへの依存性が大きく、特に多結晶バルク材の  $J_c$  は現状では低いレベルにとどまっている。本研究は、酸化物超伝導多結晶バルク材の  $J_c$  値の向上を目指すとともに、4.2~77 K 間での熱伝導度の評価をもとに、 $Nb_3Sn$  超伝導マグネットの電流リードに応用し、He 冷媒を用いずに冷凍機による伝導冷却のみで励磁を可能にした経緯をまとめたもので、全編 7 章よりなる。

第 1 章は序論であり、本研究の背景とその目的を述べている。

第 2 章では、部分熔融法により作製した Y 系酸化物の組織的特徴と  $J_c$  特性について検討を行い、結晶配向制御及び変態に伴う欠陥発生の問題が Y 系多結晶バルク材を作製する上で難点になることを指摘している。

第 3 章は、Bi 系 (2223) 相の  $J_c$  に及ぼす中間プレスの効果について述べたものであり、初期焼結後のプレス加圧と焼結の繰返しが緻密化、単相化、結晶配向性向上に有効なことを示し、その最適条件を明らかにしている。

第 4 章では、プレス加圧を CIP に置換え、電流リードを念頭に中実円筒形状のバルク材を作製し、その  $J_c$  特性、通電状態における 77 K から 4.2 K への熱侵入量を計測している。熱侵入量の大半が高温端からの伝導熱であり、かつ低熱伝導ゆえに、従来の金属電流リードを凌ぐ特性を具備し、電流リードとして有望であるとの結果を得ている。

第 5 章では、加圧効果が表面近傍に集中し易いことを考慮し、リード形状を薄肉中空円筒とすることによって、 $J_c$  の大幅な向上が達成できたことを述べている。また、800 A 通電時の 77 K から 4.2 K への熱侵入量は 0.16 W であり、最適設計された He ガス冷却型 Cu リードの 1/10 以下に抑えられること、圧壊強度が常温で 64 MPa、77 K で 77 MPa であることを示している。

第 6 章では、 $Nb_3Sn$  超伝導マグネットの電流リードに Bi 系超伝導体を適用し、液体 He を冷媒として用いることなしに、冷凍機のみによる伝導冷却でマグネットを励磁させることに成功した経緯について述べており、システムの熱収支及び総合性能を評価すると共に、本研究の工学的意義について言及している。

第 7 章は、本研究で得られた成果を総括し、結論としている。

以上要するに、本論文は、Bi 系酸化物超伝導多結晶体の  $J_c$  特性を実用規模にまで高めると共に、これを超伝導マグネットの電流リードに適用し、冷凍機冷却方式を確立する上での多くの重要な知見を得たものであり、材料加工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士 (工学) の学位論文として合格と認める。